

USUWANIE FOSFORANÓW Z POFERMENTACYJNYCH CIECZY OSADOWYCH

Elżbieta Sparczyńska¹

¹ Katedra Chemii, Technologii Wody i Ścieków, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Politechnika Częstochowska, ul. J.H. Dąbrowskiego 73, 42-201 Częstochowa, e-mail: sparczyńska@is.pczest.pl

STRESZCZENIE

Badania prowadzono w kierunku oceny przydatności koagulantów stosowanych w skali technicznej w procesach oczyszczania wody do zmniejszenia zawartości fosforanów w cieczach osadowych. Celem badań była ocena efektywności usuwania związków fosforu z cieczy osadowych pofermentacyjnych przy zastosowaniu wstępnie zhydrolizowanych chlorków poliglinu (nisko, średnio i wysoko zasadowych) oraz siarczanu glinu jako koagulanta odniesienia. Do badań wykorzystano ciecze osadowe pochodzące z odwadniania przefermentowanych komunalnych osadów ściekowych z oczyszczalni ścieków o RLM powyżej 100 000. Jako środków strącających użyto produkty handlowe wstępnie zhydrolizowanych chlorków poliglinu PAX 18, PAX XL10, PAX-XL1905 oraz siarczan glinu. Badania wykonano dla trzech różnych dawek dla każdego z koagulantów: 0,7; 1,0; 1,5 krotności dawki stechiometrycznej wynikającej z reakcji chemicznej tworzenia nierozpuszczonego fosforanu glinu. Surowe ciecze osadowe charakteryzowały się bardzo wysokimi stężeniami związków azotu ($891 \text{ mgN}_{\text{Kj}}/\text{dm}^3$), fosforanów ($125 \text{ mgPO}_4^{3-}/\text{dm}^3$) oraz związków organicznych oznaczonych jako ChZT ($592 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$). W procesie chemicznego strącania najwyższą efektywność usuwania fosforanów uzyskano dla najwyższych stosowanych dawek dla wszystkich koagulantów. Najwięcej fosforanów usunięto przy użyciu PAX 18 (96%). Równocześnie ze zmniejszeniem ilości związków fosforu zanotowano niewielkie zmniejszenie ilości związków organicznych oznaczanych jako ChZT_{cr}, maksymalnie 47% przy zastosowaniu wysokozasadowego PAX XL 1905. Zastosowanie najmniejszej dawki pozwoliło osiągnąć efektywność usuwania fosforanów na poziomie 50% dla $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ oraz 83% dla PAX 18.

Słowa kluczowe: usuwanie fosforanów, ciecze osadowe, wstępnie zhydrolizowane koagulanty

PHOSPHATES REMOVAL FROM REJECT WATER FROM DIGESTION OF SLUDGE

ABSTRACT

The aim of the research work was to evaluate if coagulants used on technical scale are useful in phosphates removal from reject water. Effectiveness of phosphorus compounds removal from reject water from digestion of sewage sludge was examined. Selected prehydrolysed alkaline aluminium polychlorides were used. The results were compared to the ones obtained with aluminium sulphate. Reject water from digestion of sewage sludge from WWTP of 100 000 PE were examined. Commercial agents – prehydrolysed PAX 18, PAX XL10, PAX-XL1905 as well as aluminium sulphate were used. Various doses of coagulants: 0.7; 1.0; 1.5 – time higher than stoichiometric dose were applied. Stoichiometric dose was calculated based on chemical reaction of insoluble aluminium phosphate formation. Concentrations of Kjeldahl nitrogen ($891 \text{ mgN}_{\text{Kj}}/\text{dm}^3$), phosphates ($125 \text{ mgPO}_4^{3-}/\text{dm}^3$) and organic compounds – COD ($592 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$) in reject water were very high. The effectiveness of coagulation process increased as the doses of chemical agents increased. The most effective doses were the highest ones used during the experiment. The most effective agent was PAX 18 (96% removal efficiency). As the phosphates concentration decreased COD content declined simultaneously. Maximum COD removal (47%) was obtained when highly alkaline PAX XL 1905 was used. Use of the lowest dose of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ allowed for 50% phosphates removal, whereas the lowest dose of PAX 18 decreased phosphates concentration by 83%.

Keywords: phosphates removal, reject water, prehydrolysed coagulants

WSTĘP

W procesach przeróbki osadów ściekowych dochodzi do oddzielenia cieczy od osadu, a wygenerowane ciecze osadowe traktowane są, jak silnie stężone ścieki. W większości przypadków zwracane są one do głównego ciągu technologicznego przed część mechaniczną oczyszczalni bez wcześniejszego oczyszczenia. Nie stosuje się również wyrównania składu cieczy osadowych w zbiorniku retencyjnym, przed połączeniem ich ze ściekami surowymi [Ryzińska, 2006]. Recyrkulowane w układzie oczyszczania ścieków ciecze osadowe z odwadniania osadu przefermentowanego wpływają na wzrost podstawowych wskaźników w oczyszczanych ściekach, głównie azotu i fosforu, powodując obniżenie efektywności pracy poszczególnych urządzeń technologicznych i tym samym utrudniając prawidłową pracę oczyszczalni [Boruszko, 2003]. Zanieczyszczenia organiczne występujące w cieczech pofermentacyjnych to przede wszystkim nierozkładalne biologicznie związki, najczęściej w formie rozpuszczonej [Styka W., Beńko P., 2007]. Ich zawartość w cieczech osadowych ściśle związana jest z przebiegiem beztlenowej stabilizacji osadów. Nie wszystkie substancje organiczne, podczas fermentacji metanowej, przetwarzane są w gaz pofermentacyjny. W skład cieczy pofermentacyjnych wchodzi także: lotne kwasy tłuszczowe, metale ciężkie, gazy rozpuszczone (metan, amoniak, CO₂, H₂S), węglany, kationy potasu i magnezu [Piaskowski K., 2008]. Przykładowo ciecze osadowe (dane pochodzące z trzech różnych oczyszczalni ścieków komunalnych o RLM powyżej 100 000 zawartość) zawierają: związki organiczne oznaczone jako ChZT_{Cr} od 102 do 4000 mg O₂/dm³, BZT₅ od 45 do 330 mg O₂/dm³, azot ogólny od 60 do 50 mg Nog/dm³, fosfor ogólny od 11,7 do 65,0 mg P/dm³ [Konieczny K., 2008, Boruszko D., 2002]

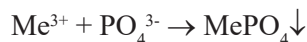
Ilość cieczy osadowych generowana w oczyszczalniach ścieków jest zróżnicowana; z reguły nie przekracza od 1 do 2,5% ilości oczyszczanych ścieków. Stężenia związków biogenych występujących w cieczech osadowych zależą od układu technologicznego procesu oczyszczania ścieków, jak i od urządzeń stosowanych do odwadniania przefermentowanych osadów czy też środków wspomagających odwadnianie osadów. Mimo, że ilość cieczy osadowych jest stosunkowo mała, to przyczynia się do zwiększenia obciążenia substratowego od 10% do 30% związkami azotu i od

10% do 80% związkami fosforu w głównym strumieniu oczyszczanych ścieków magnezu [Piaskowski K., 2008].

Uwzględniając ilość powstających cieczy osadowych oraz ich skład, powinny być one wstępnie oczyszczone ze związków azotu, fosforu i materii organicznej przed wprowadzeniem do głównego strumienia oczyszczania ścieków [Guo i inni., 2009]. Może to znacząco zmniejszyć obciążenie związkami biogenymi głównego strumienia oczyszczanych ścieków.

Ciecze osadowe mają bardzo niekorzystny stosunek biodegradowalnych związków organicznych do azotu dla klasycznego procesu usuwania azotu, mianowicie autotroficznej nitrifikacji/denitryfikacji heterotroficznej. Jednak nowe procesy mikrobiologiczne takie jak Sharon, utlenianie beztlenowe amonu (Anammox) czy CANON, itd., mogą zostać wykorzystane do eliminacji azotu [Ryzińska J., 2006a, Van Der Star, 2007]. Usunięcie fosforanów może być prowadzone przez wytrącanie chemiczne z użyciem soli glinu i/lub żelaza.

Usuwanie fosforanów poprzez chemiczne strącanie odbywa się dzięki tworzeniu nierozpuszczonego fosforanu glinu lub żelaza (Me), według poniższej reakcji chemicznej:



1 mol Me³⁺ reaguje z 1 molem PO₄³⁻, co oznacza, że aby usunąć 95 g PO₄³⁻ potrzeba 27 g Al³⁺ lub 56g Fe³⁺. Uwzględniając skład fizykochemiczny cieczy osadowych (przede wszystkim mętność, barwę i zawiesinę), w procesie strącania fosforanów ilość stosowanego glinu/żelaza jest większa od stechiometrycznej, wyliczonej na podstawie reakcji chemicznej. Dawkę koagulantu wylicza się na podstawie informacji o stężeniu fosforanów w ściekach, wyboru rodzaju koagulantu, miejsca jego dawkowania oraz o ilości fosforu dla ścieków oczyszczonych [Heindrich, Witkowski, 2015].

MATERIAŁY I METODY BADAŃ

Badania prowadzono w kierunku oceny przydatności koagulantów stosowanych w skali technicznej w procesach oczyszczania wody do zmniejszenia zawartości fosforanów w cieczech osadowych. Celem badań była ocena efektywności usuwania związków fosforu z cieczy osadowych pofermentacyjnych przy zastosowaniu

wstępnie zhydrolizowanych chlorków poliglinu (nisko, średnio i wysoko zasadowych) oraz siarczanu glinu jako koagulantu odniesienia. Do badań wykorzystano ciecze osadowe pochodzące z odwadniania przefermentowanych komunalnych osadów ściekowych z oczyszczalni ścieków o RLM powyżej 100 000. Jako środków strącających użyto produkty handlowe wstępnie zhydrolizowanych chlorków poliglinu PAX 18, PAX XL10, PAX-XL1905 oraz siarczan glinu.

Dawkę koagulantu D_k wyliczono według wzoru:

$$D_k = \frac{\beta \cdot c \cdot M_{Al}}{M_p} \left[\frac{gAl^{3+}}{m^3} \right],$$

gdzie: β – współczynnik uwzględniający punkt dawkowania koagulantu oraz poziom, do jakiego należy usunąć fosforany; w praktyce przyjmuje się $\beta = 1$ (warunki korzystne) lub 1,5 jeżeli fosfor dla ścieków oczyszczonych poniżej 1 mgP/dm³; β może przyjmować wartości nawet od 2 do 3 [Heindrich, 2004]

c – stężenie fosforanów w cieczech osadowych, [mg PO₄³⁻/dm³]

M_{Al} – masa molowa glinu, [g/mol]

M_p – masa molowa fosforu, [g/mol]

Cechą koagulantów z grupy PAX w odróżnieniu od koagulantów niezhydrolizowanych wstępnie jest to, że zawierają one grupy hydroksylowe decydujące o ich zwiększonej zasadowości. Badania wykonano dla trzech różnych dawek dla każdego z koagulantów, przyjmując w obliczeniach dawki D_k współczynnik $\beta = 0,7; 1,0; 1,5$. Współczynnik β jest krotnością dawki stechiometrycznej wynikającej z reakcji chemicznej tworzenia nierozpuszczonego fosforanu glinu, co oznacza że do badań użyto koagulanty w mniejszej, równej i większej od stechiometrycznej. Do badań wybrano trzy PAX-y – nisko, średnio i wysokozasadowy; o zasadowości decyduje iloraz liczby moli OH⁻ do liczby moli Al³⁺ w koagulancie określanej jako współczynnik $r = [OH^-]/[Al^{3+}]$

i traktowany jako miara stopnia polimeryzacji. Zasadowość koagulantu oblicza się z zależności: zasadowość = $r/0,03$. Charakterystykę wybranych PAX-ów [Karty charakterystyk koagulantów, 2016] przedstawiono w tabeli 1. Do badań przygotowano roztwory koagulantów, tak rozcieńczając produkty handlowe, aby wyliczona wcześniej dawka rozcieńczonych koagulantów miała objętość od 10 do 15 cm³. Siarczan glinu również wprowadzany był w postaci roztworu.

Badania prowadzono z wykorzystaniem konwencjonalnego testu zlewkowego (jar test). Materiał badawczy do testów technologicznych w skali laboratoryjnej, przygotowano przez uśrednienie pobranych cieczy osadowych. Do zlewki o pojemności 2 dm³ wprowadzano 1 dm³ cieczy osadowych. Następnie wprowadzono koagulanty w dawkach obliczonych na podstawie wzoru. Przy użyciu mieszadła mechanicznego przeprowadzono szybkie mieszanie przez 2 min (200 rpm), a następnie przez 28 min wolne mieszanie (30 rpm). Po tym czasie próbki poddano sedymentacji przez 1 h. Następnie zdekantowano 400 cm³ cieczy i przeprowadzono jej analizę. Badania prowadzono w temperaturze pokojowej (20–22 °C)

Przed i po procesie koagulacji oznaczono następujące parametry:

- pH – metodą potencjometryczną,
- zasadowość – metodą miareczkową potencjometryczną [Standard Methods, 1998]
- ChZT_{Cr} – metodą dwuchromianową skróconą, PN-74/C-04578.03
- N-NH₄⁺ – metodą miareczkową po destylacji [Standard Methods, 1998]
- PO₄³⁻ – metodą spektrofotometryczną [Standard Methods, 1998]
- NTK – miareczkową po mineralizacji [Standard Methods, 1998]

Parametry oznaczane dla surowych cieczy osadowych wykonano nie później niż 3 h po pobraniu. Wartości poszczególnych parametrów wyliczono jako średnią z trzech powtórzeń.

Tabela 1 . Charakterystyka koagulantów użytych w badaniach

Table 1. Characteristic of coagulants used in the study

Koagulant	Al ³⁺ , %	Zasadowość, %	Zawartość chlorków, %	pH
PAX 18	9	41	21	1,0
PAX XL 10	5	70	11,5	2,5
PAX XL 1905	6	85	5	3,6

WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Ciecze osadowe charakteryzowały się wysoką brunatną barwą i mętnością. Związki biogenne występowały w wysokich stężeniach – ilość fosforanów wynosiła $125 \text{ mg PO}_4^{3-}/\text{dm}^3$, a azotu amonowego $844 \text{ mg N-NH}_4^+/\text{dm}^3$. Charakterystykę fizyko-chemiczną badanych cieczy osadowych podano w tabeli 2

Procesowi strącania fosforanów towarzyszył spadek nieznaczny wartości pH oraz zasadowości. Największe zmiany zaobserwowano dla prób przy stosowaniu siarczanu glinu oraz PAX 18. Zarówno pH jak i zasadowość najbardziej zmniejszała się wraz ze wzrostem dawki każdego koagulantu. Zmiany wybranych parametrów po procesie strącania przedstawiono w tabeli 3.

Po procesie strącania we wszystkich próbach zaobserwowano obniżenie ilości fosforanów. Efektywność usuwania związków fosforu wzrastała wraz ze wzrostem dawki. Najniższe zmniejszenie P zanotowano dla próbek przy użyciu $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ od 51% do 73% (rys. 1). Najwyższą efektywnością usuwania P wykazało zastosowanie PAX 18 od 83% do 96%. W próbach z dodatkiem PAX XL 1905 otrzymano zmniejszenie fos-

foru od 81% do 88%, natomiast dla PAX XL 10 od 57% do 84%. Zwiększenie dawki najbardziej wpłynęło na efektywność usuwania fosforu przy zastosowaniu PAX XL 10, 27%. Najmniej wpływ dawki koagulantu był widoczny przy stosowaniu wysokozasadowego PAX XL 1905 – tylko 7%. Przy wprowadzeniu dawki w ilości 0,7, w stosunku do stechiometrii reakcji strącania fosforanu glinu możliwe było zmniejszenie ilości fosforanów o ponad 80% dla PAX 18 i PAX XL 1905.

Związki organiczne oznaczane jako ChZT_{Cr} były również usuwane podczas procesu strącania fosforanów. Efektywność ich usuwania rosła wraz z dawką, dla każdego z koagulantów, nie przekroczyła jednak 50% (rys. 2). Największe zmniejszenie stężenia zanotowano dla PAX XL 1905 przy każdej dawce od niespełna 26% do prawie 47%. Użycie pozostałych wstępnie zhydrolizowanych koagulantów spowodowało zmniejszenie ilości związków organicznych od 24% do 30% dla PAX XL 10 oraz od 19% do 28% dla PAX 18. Najniższą efektywność wykazał siarczan glinu, zmniejszając ilość związków organicznych od 20% do 23%. Wpływ dawki na zmniejszenie parametru ChZT_{Cr} najbardziej uwidocznił się przy stosowaniu PAX XL 1905

Tabela 2. Charakterystyka cieczy osadowych

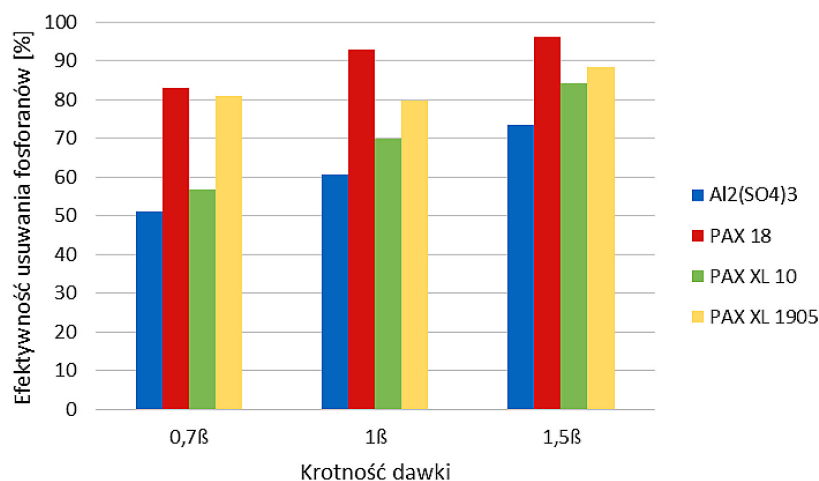
Table 2. Characteristics of reject water

Wskaźnik	Zasadowość	pH	Fosforany	Fosfor	ChZT_{Cr}	Azot amonowy	NTK
Jednostka	$\text{mg CaCO}_3/\text{dm}^3$	–	$\text{mg PO}_4^{3-}/\text{dm}^3$	$\text{mg P-PO}_4^{3-}/\text{dm}^3$	$\text{Mg O}_2/\text{dm}^3$	$\text{mg N-NH}_4^+/\text{dm}^3$	$\text{Mg N}_{\text{KJ}}/\text{dm}^3$
Wartość	3490	7,89	125,00	40,8	592	844	891

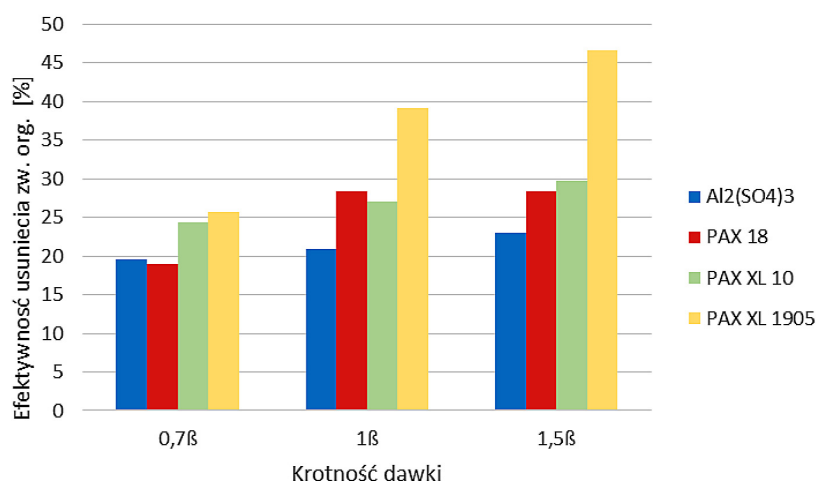
Tabela 3. Zmiana wybranych parametrów podczas usuwania fosforanów z cieczy osadowych

Table 3. Change in selected parameters of reject water during the removal of phosphates

Koagulant parametr	β – krotność dawki	Zasadowość	pH	Fosforany	Fosfor	ChZT_{Cr}
		$\text{mg CaCO}_3/\text{dm}^3$	–	$\text{mg PO}_4^{3-}/\text{dm}^3$	$\text{mg P-PO}_4^{3-}/\text{dm}^3$	$\text{Mg O}_2/\text{dm}^3$
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	0,7	3185	7,62	61,09	20,0	476
	1,0	2985	7,51	49,26	16,1	468
	1,5	2335	7,39	33,21	10,9	456
PAX 18	0,7	3085	7,61	21,23	6,9	480
	1,0	2940	7,47	7,62	2,5	424
	1,5	2660	7,33	4,86	1,6	424
PAX XL 10	0,7	3205	7,76	54,12	17,7	448
	1,0	3090	7,68	37,43	12,2	432
	1,5	2975	7,62	19,61	6,4	416
PAX XL 1905	0,7	3200	7,79	23,59	7,7	440
	1,0	3015	7,68	25,11	8,2	360
	1,5	2810	7,58	14,59	4,8	316



Rys. 1. Efektywność usuwania fosforanów w zależności od dawki oraz rodzaju koagulantu
Fig. 1. The effect of the dose and type of coagulant on the effectiveness of phosphates removal



Rys. 2. Efektywność usuwania związków organicznych oznaczonych jako ChZT_{Cr} w zależności od dawki oraz rodzaju koagulantu

Fig. 2. The effect of the dose and type of coagulant on the effectiveness of COD removal

– zwiększenie dawki stechiometrycznej z 0,7 do 1,5 pozwoliło zwiększyć efektywność o 20%. Najmniejsze znaczenie dawki koagulantu na usuwanie związków organicznych zanotowano przy zastosowaniu siarczanu glinu – zwiększenie dawki stechiometrycznej z 0,7 do 1,5 spowodowało wzrost efektywności tylko o 3%.

Przy 96%-ym usunięciu fosforanów, zmniejszenie ilości związków organicznych wyniosło 28% (PAX 18 1,5 dawki), natomiast przy najwyższym usunięciu związków organicznych wynoszącym 47% zmniejszenie ilości fosforanów wyniosło 88% (PAX XL1905 1,5 dawki).

Należy zaznaczyć, iż zdekantowane próbki po procesie strącania charakteryzowały się niższą barwą i mętnością od cieczy osadowych surowych.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zastosowanie wstępnie zhydrolizowanych soli, chlorków poliglinu, pozwoliło na wysokoefektywne usunięcie związków fosforu od 51% przy zastosowaniu 0,7 dawki siarczanu glinu do 96% przy użyciu 1,5 dawki wstępnie zhydrolizowanego nisko zasadowego PAX 18. Przy stosowaniu wymienionych wcześniej wstępnie zhydrolizowanych chlorków poliglinu, równocześnie ze zmniejszeniem ilości związków fosforu zanotowano niewielkie zmniejszenie ilości związków organicznych oznaczanych jako ChZT_{Cr} (od 19% do 47%). Przy najwyższym (96%) usunięciu fosforanów, osiągniętym po zastosowaniu PAX 18 w dawce 1,5 razy większej od stechiometrycznej,

jednocześnie uzyskano zmniejszenie ilości związków organicznych o 28%. Najwyższej efektywności usunięcia związków organicznych – ChZT_{Cr} wynoszącej 47%, uzyskanej po zastosowaniu wysokozasadowego PAX XL 1905 w dawce 1,5 razy większej od stechiometrycznej, towarzyszyło zmniejszenie ilości fosforanów o 88%. Należy zaznaczyć, że część dawki koagulantów została wykorzystana na usunięcie barwy i mętności z cieczy osadowych. Jednocześnie istotne jest, że zastosowanie koagulantów glinowych nie spowodowało znacznego spadku pH oraz zasadowości.

Efektywność usuwania fosforanów z cieczy osadowych nie musi być bardzo wysoka, gdyż cieczy te wprowadzane są do głównego strumienia oczyszczania ścieków. Stosowanie siarczanu glinu, nawet bez korekty pH, pozwoliło na uzyskanie ilości fosforu w cieczach osadowych niewiele wyższego od występujących w ściekach doprowadzanych do oczyszczalni ścieków.

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Zastosowanie koagulantów wstępnie zhydrolizowanych do usuwania związków fosforu z cieczy osadowych pozwoliło na osiągnięcie efektywności zmniejszenia stężenia PO_4^{3-} maksymalnie o 96%.
2. Najefektywniej fosforany były usuwane przez nisko zasadowy PAX 18 przy zastosowaniu nadmiaru dawki.
3. Najlepiej związki organiczne były usuwane przy użyciu wysokozasadowego PAX XL 1905.

Podziękowania

Badania wykonano w ramach BS-PB-402-301/11.

LITERATURA

1. Boruszko D., 2002. Obciążenie zwrotne z przeróbki osadów ściekowych. Materiały konferencyjne, I Kongres Inżynierii Środowiska, Monografie 11, Lublin, 431–436.

2. Boruszko D., 2003. Gospodarka wodami osadowymi – aspekty techniczno-ekonomiczne. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Inżynieria Środowiska, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok, z. 16, 258–267.
3. Guo, C.H., Kuang, S.L., Stabnikov, V., Ivanov, V., 2009. The removal of phosphorus from wastewater using anoxic reduction of iron ore in the rotating reactor. *Biochem. Eng. J.* 46, 223–226.
4. Heidrich Z., 2004. *Kanalizacja*, wyd. III. WSiP, Warszawa.
5. Heidrich Z., Witkowski A., 2015. *Urządzenia do oczyszczania ścieków – projektowania przykłady obliczeń*, wyd. III. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa.
6. Karty charakterystyk koagulantów, www.weglos-tal.com (styczeń 2016).
7. Konieczny K., 2008. Oczyszczanie wód osadowych a odwrócona osmoza. *Wodociągi i Kanalizacja*, 11, 84–86.
8. Malej J., Majewska A., Boguski A., 2002. Wybrane problemy oczyszczania wód osadowych. *Rocznik Ochrony Środowiska*, tom 4, Politechnika Koszalińska.
9. Piaskowski K., 2008. Generowanie ładunków powrotnych fosforu podczas przeróbki osadów ściekowych. *GWITS*, 1, 22–26.
10. Rzyzińska J., 2006. Problem wód osadowych i możliwości ich oczyszczania w Polsce. *GWITS*, 7-8, 58–62.
11. Rzyzińska J., 2006a, Wydzielone usuwanie azotu z wód osadowych, *Forum eksploatatora*, 4, 32–35.
12. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 1998, 20th ed., American Public Health Association/Water Environment Federation, Washington, DC.
13. Styka W., Beńko P., 2007. Wpływ gospodarowania wodami osadowymi na usuwanie azotu ze ścieków miejskich. *GWITS*, 9, 16–20.
14. Van Der Star W.R.L., Abma W.R., Blommers D., Mulder J-W., Tokutomi T., Strous M., Picioreanu C., Van Loosdrecht M.C.M., 2007. Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: Experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam. *Water Research*, 41, 4149–4163.